



REGIONE
PUGLIA



PROVINCIA
DI TARANTO



COMUNE
DI TARANTO



Proponente	 B72 srl Sede: Viale A. Volta, 101 50131 Firenze Cf/P.Iva 07230410487				
Progettazione, Coordinamento e progettazione elettrica	 STUDIO INGEGNERIA ELETTRICA MEZZINA dott. ing. Antonio Via T. Solis 128 71016 San Severo (FG) Tel. 0882.228072 Fax 0882.243651 e-mail: info@studiomezzina.net Ordine degli ingegneri della Provincia di Foggia matr. n 1604		 		
Studio e progetto ecologico vegetazionale	 Dott. Biol. Leonardo Beccarisi Via D'Engghien, 43 - 73013 Galatina (LE) cell. 3209709895 E-Mail: beccarisil@gmail.com Ordine nazionale dei Biologi Albo-Sezione matr. n. AA_067313	Studio di impatto ambientale	 Dott.ssa Anastasia Agnoli Via Armando Diaz, 37 73100 Lecce (LE) cell. 3515100328 E-Mail: anastasia.agnoli989@gmail.com		
Studio meteorologico	Dott. Biol. Elisa Gatto Via S. Santo, 22 73044 Galatone (LE) cell. 3283433525 E-Mail: dottelisagatto@gmail.com Ordine nazionale dei Biologi matr.n. AA_090001	Studio paesaggistico e di inserimento urbanistico	 Dott. Agr. Barnaba Marinosci via Pilella 19, 73040 Alliste (LE) Cell. 329 3620201 E-Mail: barnabamarinosci@gmail.com Ordine dei Dottori Agronomi e Forestali provincia di Lecce matr. n 674		
Studio faunistico	 Dott. Antonio Feola Via Civitella n°25 84060 Moio della Civitella (SA) cell. 338 2593262 E-Mail: feolantx@gmail.com Ordine Nazionale dei Biologi matr. n . AA_047004	Rappresentazioni fotografiche	 Arch. Gaetano Fornarelli Via Fulcignano Casale 17 73100 Lecce (LE) cell. 3358758545 E-Mail: forgaet@gmail.com Ordine degli Architetti della provincia di Lecce matr. n 1739		
Studio archeologico	Dott. Archeologo Antonio Mangia cell. 338 3362537 E-Mail: amangia@yahoo.it Elenco Nazionale dei Professionisti dei Beni Culturali del Ministero della Cultura n.1516	Consulenza strutturale	 Ing. Tommaso Monaco Tel. 0885.429850 Fax 0885.090485 E-Mail: ing.tommaso@studiotecnicomonaco.it Ordine degli Ingegneri della provincia di Foggia matr. n. 2906		
Studio acustico	 Ing. Antonio Falcone Tel. 0884.534378 Fax. 0884.534378 E-Mail: antonio.falcone@studiofalcone.eu Ordine degli Ingegneri di Foggia matr. n.2100	Consulenza topografica	Geom. Matteo Occhiochiuso Tel. 328 5615292 E-Mail: matteo.occhiochiuso@virgilio.it Collegio dei Circondariale Geometri e Geometri Laureati di Lucera matr. n. 1101		
Studio grafico geologico e geotecnico	Dott. Nazario Di Lella Tel./Fax 0882.991704 cell. 328 3250902 E-Mail: geol.dilella@gmail.com Ordine regionale dei Geologi della Puglia matr. n. 345				
Opera	Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto Fotovoltaico denominato " BUFFOLUTO 1" da realizzarsi su aree demaniali in località "Buffoluto" nel territorio comunale di Taranto (TA) per una potenza complessiva di 23,857 MWp con sistema di accumulo da 25/50 MW/MWh nonchè delle opere connesse ed infrastrutture indispensabili alla costruzione e all'esercizio dell'impianto				
Oggetto	AUTORITA' PROCEDENTE V.I.A. :  MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA		AUTORITA' PROCEDENTE A.U. :  REGIONE PUGLIA		
	Nome Elaborato: 9VQMNK3_DocumentazioneSpecialistica_01.2.pdf Descrizione Elaborato: Studio meteo-climatico				
00	Dicembre 2022	Progetto definitivo		Ing. A. Mezzina	B72 srl
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione
Scala:					
Formato:	Codice Pratica 9VQMNK3				



STUDIO METEO – CLIMATICO AREA: BUFFOLUTO

*Progetto di realizzazione di un impianto
fotovoltaico*

A cura di
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD
Biologa

Sommario

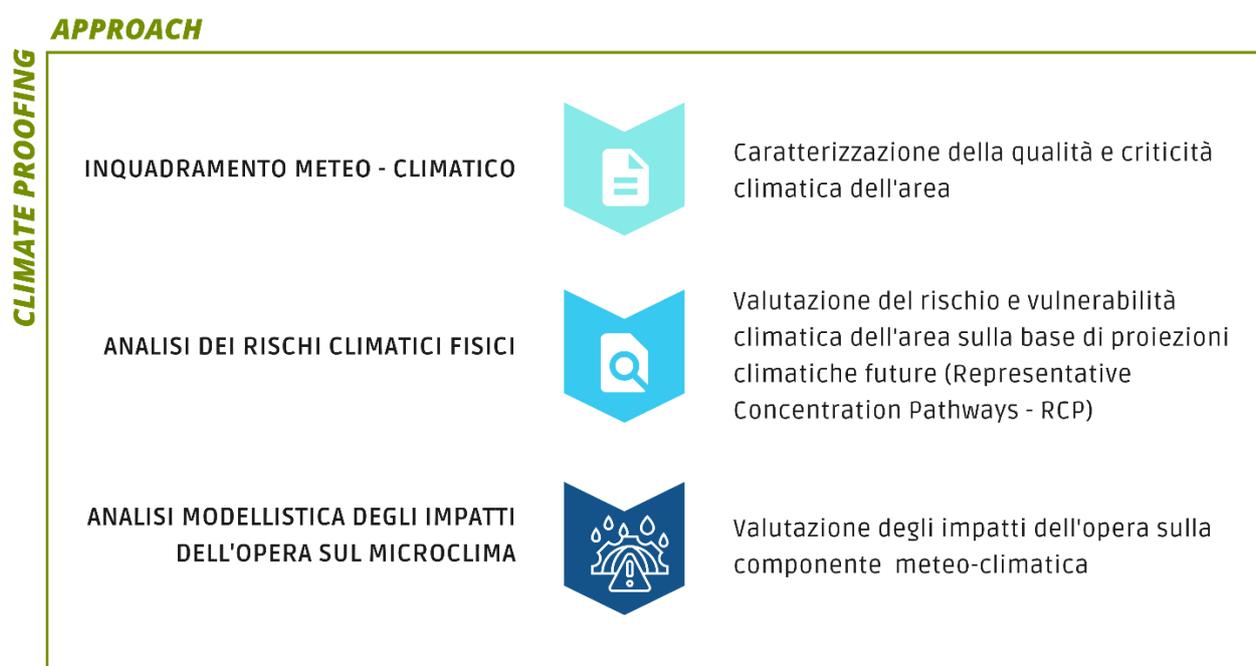
Introduzione e nota metodologica	2
1. Inquadramento meteo-climatico.....	3
1.1 Confronto con dataset storico	7
1.2 Indicatori climatici e analisi di rischio bi-dimensionale	12
2. Analisi dei rischi climatici fisici	14
2.2 Proiezioni climatiche future	14
2.3 Livello di impatto potenziale	15
2.3.1 Alte temperature	16
2.3.2 Precipitazioni intense	17
2.3.3 Siccità.....	18
2.3.4 Incendi.....	19
3. Analisi modellistica degli impatti dell'opera sul microclima	19
3.1. Studio modellistico: ENVI-met.....	20
3.1.1. Metodologia e set-up modellistico	21
3.1.2. Parametri investigati	23
3.1.2.1. Microclima	23
3.1.2.2. Albedo e inquinamento termico	23
3.1.2.3. Indici di comfort termico: Temperatura media radiante MRT.....	24
3.1.2.4. Indici di comfort termico: Temperatura fisiologica equivalente PET	24
3.2. Risultati	25
3.2.2. Micrometeorologia e Comfort termico.....	25
4. Conclusioni	27

Introduzione e nota metodologica

Il presente elaborato tecnico ha come obiettivo lo studio e caratterizzazione della condizione climatica e dei mutamenti prevedibili della stessa in un'area di Buffoluto (Taranto, Italia) da destinare alla realizzazione di un impianto fotovoltaico. È altresì mirato alla definizione di un Indice di Rischio Climatico – *Climate Risk Index* che aumenti la resilienza dell'intervento e promuova il *climate proofing* degli investimenti auspicato dalla Commissione Europea nella Strategia Europea per l'Adattamento ai Cambiamenti Climatici¹.

Le infrastrutture energetiche sono particolarmente esposte ai cambiamenti a lungo termine. È quindi necessario che si tenga conto dei cambiamenti climatici a partire dalle fasi iniziali del progetto, attraverso l'utilizzo di opportuni criteri di progettazione e l'adozione di misure tecnologiche specifiche.

Lo studio è strutturato nelle seguenti fasi di analisi:



La metodologia operativa è guidata dai documenti tecnico-scientifici di supporto della Strategia di Adattamento Europea, recepita dalla Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC, MATTM 2015)², e in particolare alla linea d'azione 1 della stessa: “Sviluppare e migliorare la conoscenza di base sugli impatti dei cambiamenti climatici, la mappatura delle vulnerabilità, e i costi e i benefici delle misure di adattamento”.

Tale studio tiene conto, inoltre, degli orientamenti tecnici sull'applicazione del principio “non arrecare un danno significativo”³ a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e resilienza⁴ ed è,

¹ EC (Commissione Europea), 2009. Libro Bianco. *L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo*.

² <http://www.minambiente.it/pagina/adattamento-ai-cambiamenti-climatici-0>. La SNAC (MATTM 2015) è stata approvata con decreto direttoriale n. 86 del 16 giugno 2015.

³ Regolamento (UE) 2020/852, detto “regolamento Tassonomia”, relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili, tramite la definizione di un sistema di classificazione (“tassonomia”) delle attività ecosostenibili.

quindi, altresì focalizzata a garantire che l'opera in esame non pregiudichi il conseguimento degli obiettivi climatici e ambientali ai sensi dell'articolo 17 del Regolamento (UE) 2020/852.

1. Inquadramento meteo-climatico

Secondo la classificazione di Köppen - Geiger⁵, l'areale in oggetto, sito nella frazione di Buffoluto (TA), è inquadrabile nella zona "Csa" (**clima caldo e temperato**), una zona climatica che interessa le aree più calde di ristrette fasce costiere dell'Italia meridionale e insulare con una media annua > 17 °C; media del mese più freddo > 10 °C; 5 mesi con media > 20 °C; escursione annua da 13 °C a 17 °C (Figura 1).

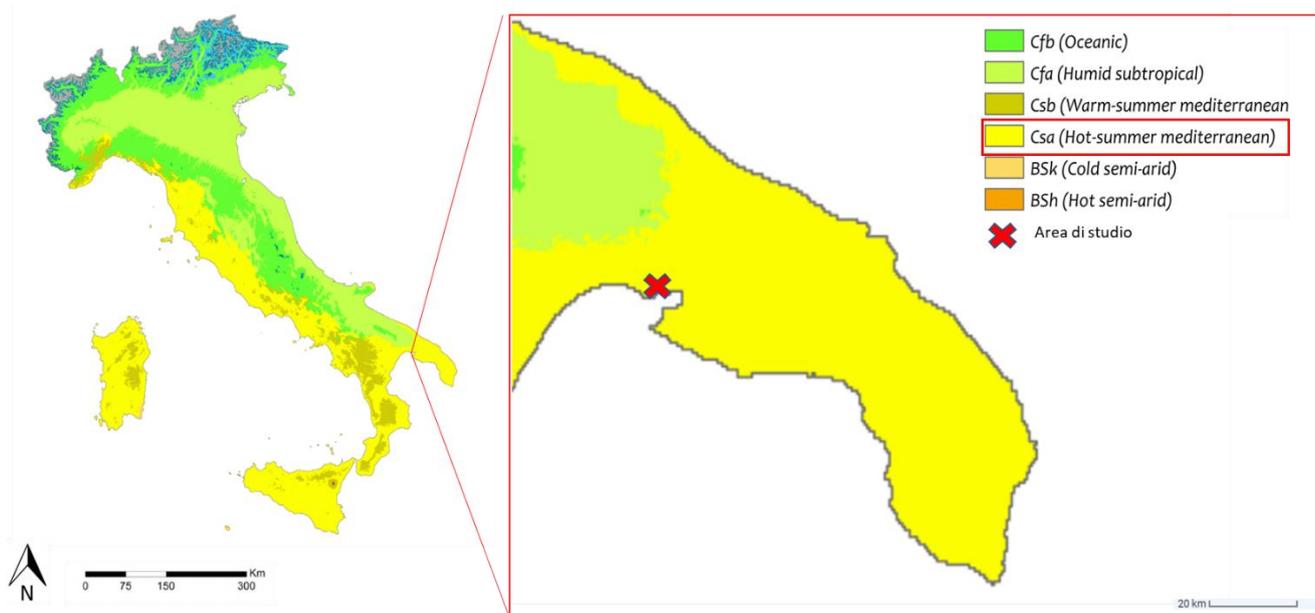


Figura 1. Carta della classificazione climatica di Köppen – Geiger del territorio italiano (sinistra) e dettaglio dell'areale di interesse (destra).

Per la descrizione meteo-climatica dell'area è stato utilizzato il dataset di rianalisi di quinta generazione ERA5⁶, prodotto utilizzando il sistema di assimilazione dei dati a variazione quadrimensionale e le previsioni dei modelli in CY41R2 dell'ECMWF, IFS (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Integrated Forecast System*). ERA5 permette un'analisi del clima locale e globale ad alta risoluzione spaziale e temporale e consente studi di maggior dettaglio e affidabilità. Le rianalisi forniscono una descrizione numerica del clima recente integrando opportunamente dati da modello e osservazioni.

La caratterizzazione climatica riportata in Tabella 1 considera l'intervallo di tempo 1990-2021 e, in particolare, le variabili di temperatura (°C), precipitazioni (mm), umidità relativa (%) e giorni di pioggia (gg). I dati relativi alle ore di sole sono stati invece raccolti nel periodo 1999-2019.

⁴ Regolamento (UE) 2021/241 del Parlamento europeo e del Consiglio riguardo i piani di ripresa e resilienza che prevede che "Nessuna misura per l'attuazione delle riforme e dei progetti di investimento inclusi nel piano per la ripresa e la resilienza arreca un danno significativo agli obiettivi ambientali ai sensi dell'articolo 17 del regolamento (UE) 2020/852 (principio «non arrecare un danno significativo»)»

⁵ Wladimir Köppen, 1936. *Das geographische System der Klimate*, in *Handbuch der Klimatologie*, vol. 1, Berlino, Borntraeger.

⁶ <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>

Dall'analisi del dataset emerge che l'area è caratterizzata da una temperatura media annuale di 17,4 °C e da una piovosità annuale di 596 mm.

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	9.3	9.6	11.8	14.7	18.9	23.9	26.8	26.8	22.6	18.6	14.6	10.7
Temperatura minima (°C)	6.5	6.6	8.4	10.9	14.8	19.4	22.1	22.4	19.1	15.5	11.8	8.1
Temperatura massima (°C)	12.1	12.6	15.2	18.2	22.6	27.8	30.8	31	26.2	21.8	17.3	13.4
Precipitazioni (mm)	62	58	60	52	34	19	13	14	50	75	90	69
Umidità(%)	77%	75%	75%	74%	70%	62%	57%	60%	68%	76%	78%	78%
Giorni di pioggia (g.)	6	6	6	6	5	3	2	2	5	6	6	7
Ore di sole (ore)	6.3	7.1	8.5	9.9	11.7	12.9	12.9	12.0	10.0	7.8	6.6	6.2

Tabella 1. Medie mensili per i parametri meteorologici considerati. L'intensità del colore è direttamente proporzionale all'intensità del valore misurato. I dati sono stati estrapolati dal dataset ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) 1990-2021.

La temperatura media del mese di Agosto, il mese più caldo dell'anno, è di 26,8 °C. Durante l'anno, Gennaio ha una temperatura media di 9,3 °C, la temperatura media più bassa di tutto l'anno.

Il mese più secco è Luglio con una media di 13 mm di pioggia e un'umidità relativa del 57 %, mentre i mesi con maggiori piogge sono Novembre con una media di 90 mm e un'umidità relativa del 78 %. La differenza tra le precipitazioni del mese più secco e quelle del mese più piovoso è 77 mm.

Le ore di sole vanno da un minimo di 6, nei mesi invernali di Dicembre e Gennaio, a un massimo di 13 nei mesi di Giugno e Luglio. Nello specifico, il grafico in Figura 2 riporta le ore giornaliere con assenza di nuvole nel dataset 1986 – 2022.

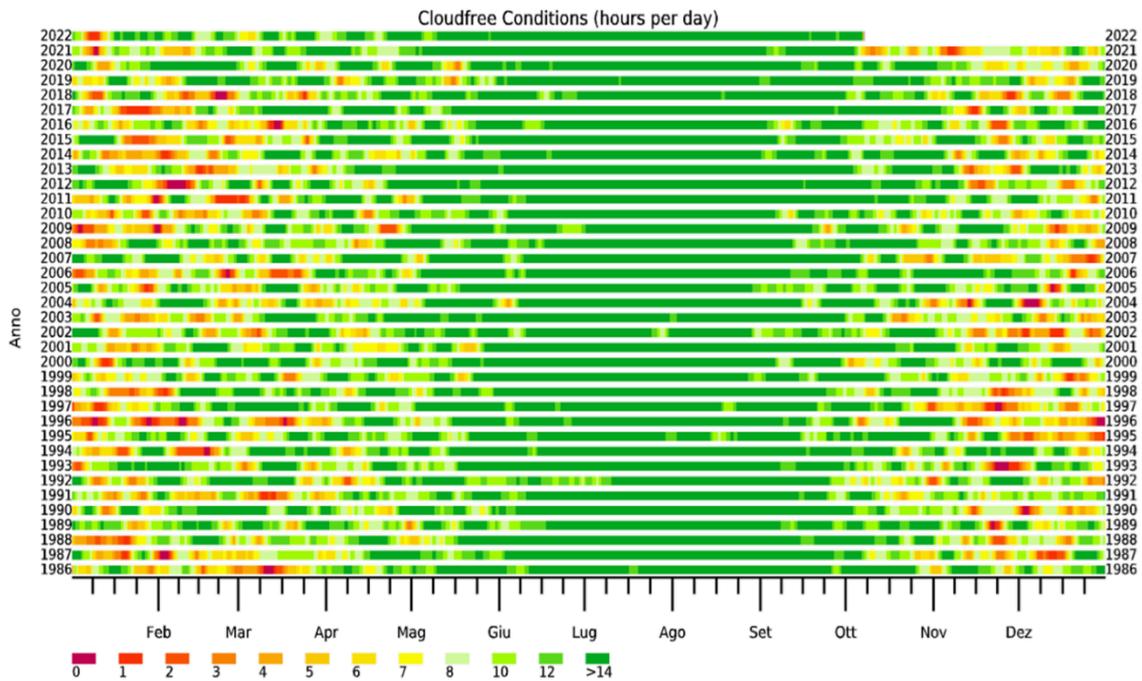


Figura 2. Distribuzione di ore giornaliere in un anno con assenza di nuvole nel dataset 1986-2022 (ERA5, ECMWF).

Come si può osservare, l'area è caratterizzata da una prevalenza di giorni con cielo terso e i periodi con nuvolosità persistente sono piuttosto ridotti e più frequenti tra Febbraio - Marzo e Novembre - Dicembre. Perciò, sotto quest'aspetto, l'area risulta potenzialmente adatta alla realizzazione di un impianto fotovoltaico.

Il riferimento principale per definire il regime anemologico dell'area in esame è rappresentato dalla rosa dei venti riprodotta in Figura 3, calcolata considerando il dataset di dati dal 2008 al 2021 e i dati del vento estratti a 10m.

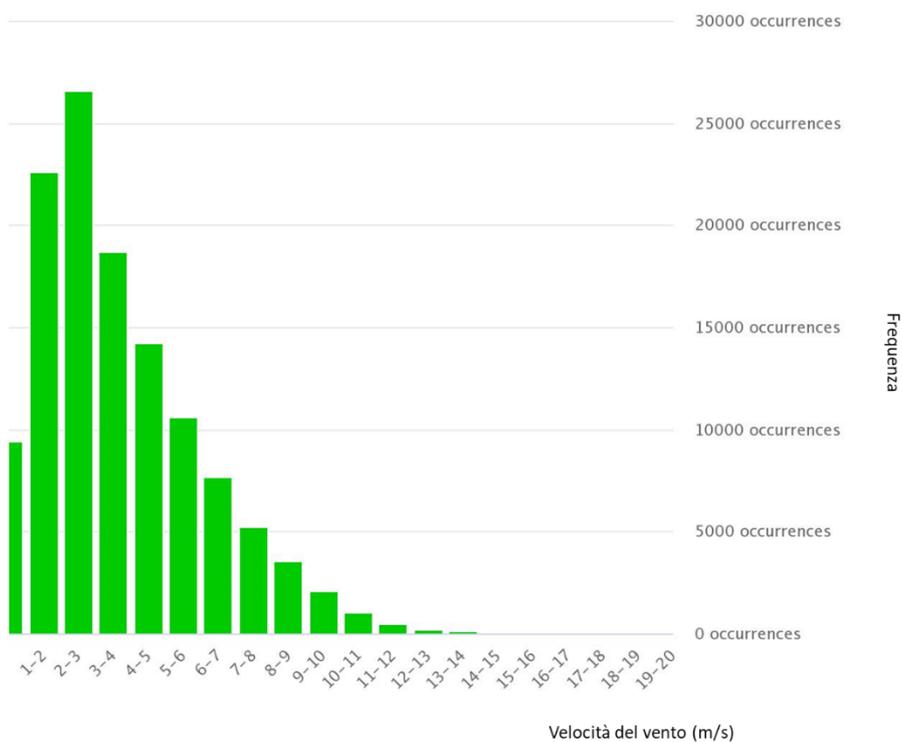
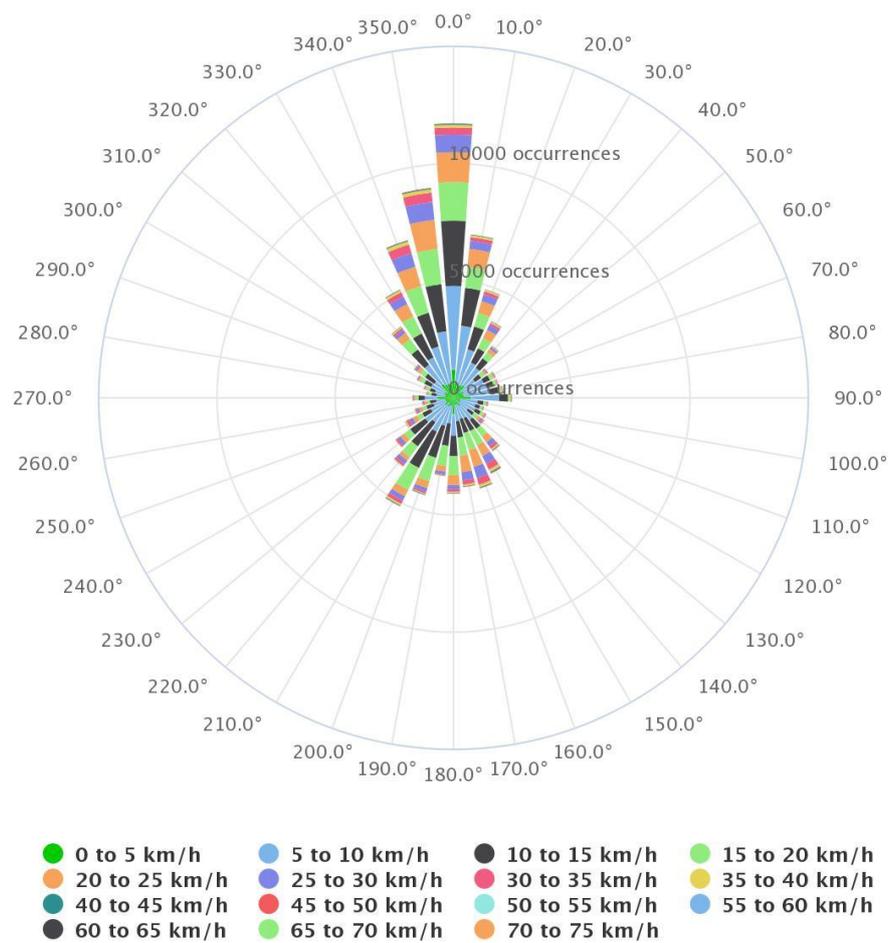


Figura 3. Rosa dei venti calcolata in base ai dati degli anni 2008-2021 (ERA5, ECMWF). L'istogramma in basso riporta la frequenza delle velocità del vento (m/s).

La forma della rosa dei venti evidenzia una prevalenza delle direzioni Nord e Nord-Ovest, comportamento caratteristico e tipico dell'hotspot climatico mediterraneo. Come si può notare, le maggiori frequenze sono associate a venti di 2-3 m/s.

1.1 Confronto con dataset storico

I meteogrammi riportati nella seguente sezione consentono di valutare le attuali variazioni del clima nell'area di interesse confrontando le variabili meteorologiche degli ultimi 12 mesi (2021-2022) al clima medio su 30 anni (ERA5, ECMWF).

1.1.1. Temperatura

Il diagramma in Figura 4 mostra la tendenza di temperatura nella stagione in corso rispetto alla temperatura media negli ultimi 30 anni. Il diagramma è contrassegnato con la temperatura (°C) e i mesi.

La linea nera indica la temperatura media di ogni mese degli ultimi 12 mesi. La linea rossa spessa indica la temperatura media calcolata negli ultimi 30 anni per ogni mese. Questa riga indica esattamente la temperatura media, ma non rivela le fluttuazioni di temperatura da un anno all'altro rese invece visibili dalla zona cuscinetto arancione intorno alla linea rossa che indica la media mensile massima e minima degli ultimi 30 anni.

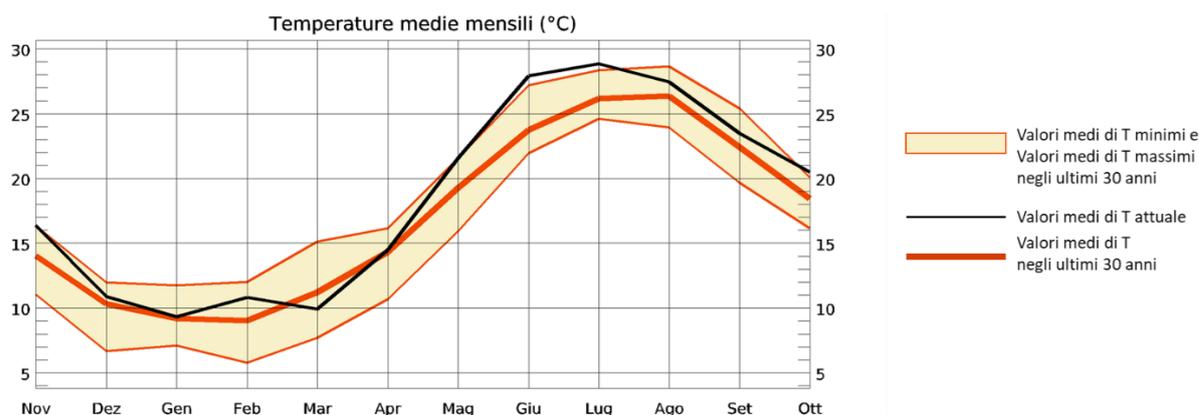


Figura 4. Confronto della temperatura corrente (ultimi 12 mesi) con la temperatura media negli ultimi 30 anni. Il diagramma è contrassegnato con la temperatura (°C) (asse y) e i mesi (asse x).

I mesi con maggiori fluttuazioni termiche negli ultimi 30 anni sono Marzo, Agosto e Settembre.

Osservando i valori medi di temperatura correnti si osserva che, in parte del mese di Maggio, nell'intero mese di Giugno e in parte del mese di Luglio la temperatura ha superato il valore massimo medio atteso di circa 0,5 °C.

1.1.2. Precipitazioni

Il diagramma in Figura 5 mostra la quantità di precipitazioni per ogni mese degli ultimi 12 mesi rispetto alle precipitazioni degli ultimi 30 anni. Il grafico è contrassegnato in millimetri di pioggia (mm) e mesi.

Le barre nere indicano le precipitazioni registrate per ognuno degli ultimi 12 mesi. Le barre blu scuro indicano le precipitazioni massime degli ultimi 30 anni per ogni mese. Le barre celesti indicano la quantità minima di precipitazioni negli ultimi 30 anni. Il confine tra il blu scuro e il celeste è la media mensile delle precipitazioni negli ultimi 30 anni.

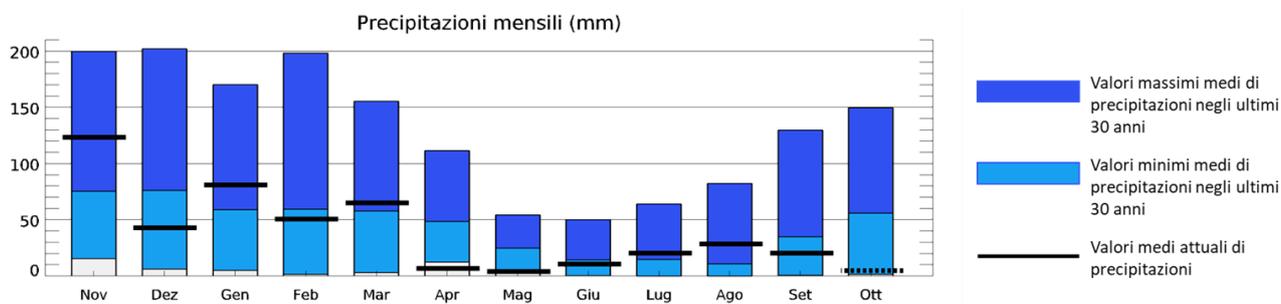


Figura 5. Confronto delle precipitazioni mensili correnti (ultimi 12 mesi) con i valori medi di precipitazioni mensili negli ultimi 30 anni. Il diagramma è contrassegnato con millimetri di pioggia (°C) (asse y) e i mesi (asse x).

Dai valori delle precipitazioni negli ultimi 30 anni si osservano più grandi fluttuazioni nei mesi invernali e in particolar modo Novembre, Dicembre e Febbraio. Le precipitazioni sono state invece più costanti nei mesi di Maggio, Giugno e Luglio.

Si osserva, inoltre, che i valori medi di precipitazioni attuali sono al di sotto della media minima degli ultimi 30 anni nel mese di Aprile e Maggio.

L'analisi del dataset storico ci consente di osservare che l'area considerata risente degli effetti del cambiamento climatico.

1.1.3. Effetti del cambiamento climatico

Ad ulteriore conferma di quanto osservato, nei diagrammi che seguono si osserva come il cambiamento climatico abbia colpito l'area di interesse negli ultimi 40 anni. La fonte di dati utilizzata è ERA5 che copre l'intervallo di tempo dal 1979 al 2021 con una risoluzione spaziale di 30 km.

I grafici riportati in Figura 6 e 7 mostrano una stima della temperatura media e delle precipitazioni totali medie annuali per Taranto e dintorni. La linea blu tratteggiata mostra la tendenza lineare del cambiamento climatico. Nella parte inferiore del grafico sono riportate le cosiddette strisce di anomalia. Ogni striscia colorata rappresenta la temperatura media di un anno: blu per gli anni più freddi e rosso per quelli più caldi.

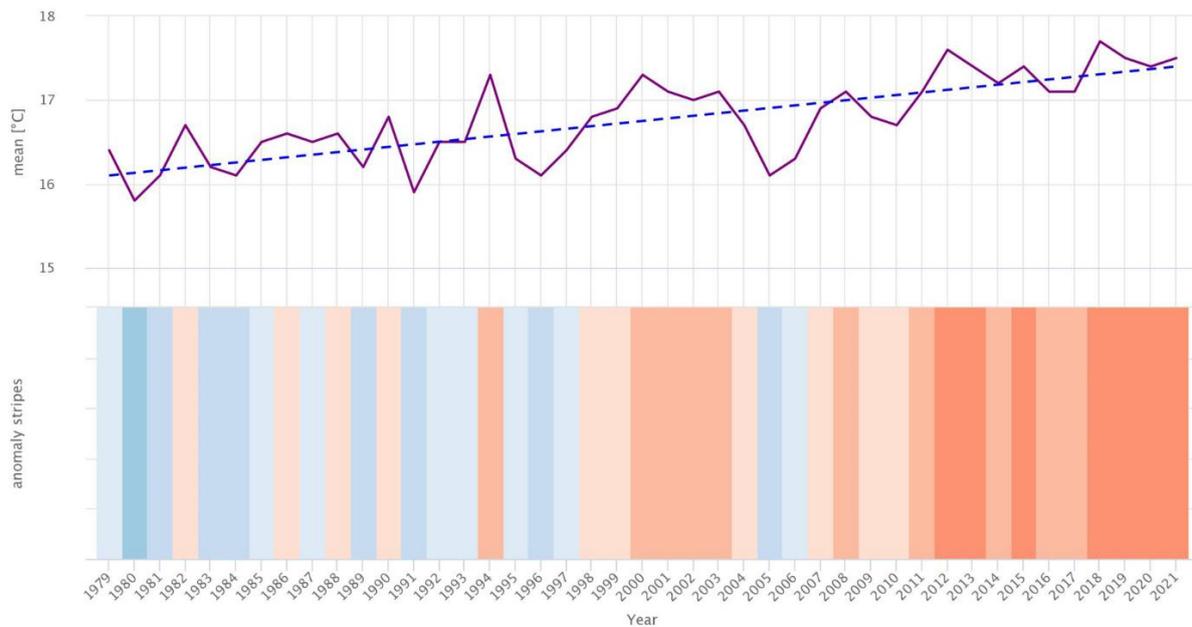


Figura 6. Stima della temperatura media annuale per Taranto e dintorni dal 1979 al 2021 (ERA5, ECMWF). La linea blu tratteggiata mostra la tendenza lineare del cambiamento climatico. In basso le strisce anomalia che rappresentano la temperatura media di un anno: blu per gli anni più freddi e rosso per quelli più caldi.

La linea di tendenza sale da sinistra a destra e ciò indica una variazione della temperatura positiva e che quindi l'area sta diventando più calda a causa del cambiamento climatico.

In particolare, si osserva che dal 2007 ad oggi la tendenza di temperatura è sempre stata positiva con un'anomalia di 0,9 °C nell'ultimo anno (2021) e un'anomalia massima di 1,1 °C nel 2018.

Il grafico in Figura 7 mostra che la linea di tendenza delle precipitazioni sale da sinistra a destra e ciò indica che la variazione delle precipitazioni è positiva e l'area sta diventando più piovosa a causa del cambiamento climatico.

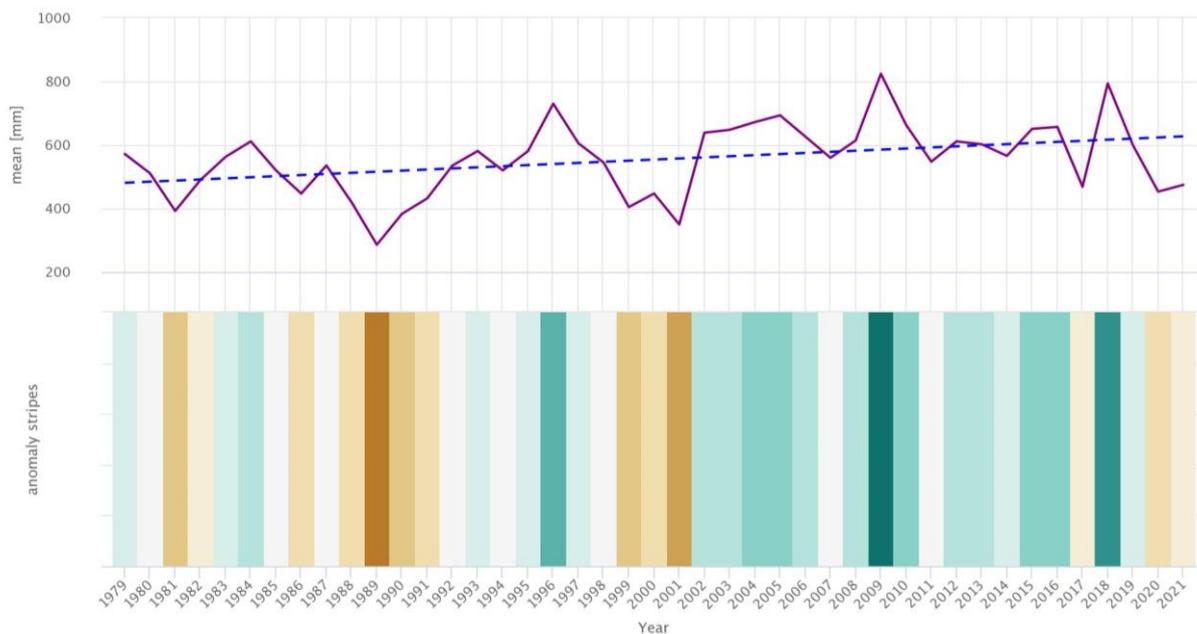


Figura 7. Stima delle precipitazioni totali medie annuali per Taranto e dintorni dal 1979 al 2021 (ERA5, ECMWF). La linea blu tratteggiata mostra la tendenza lineare del cambiamento climatico. In basso le strisce anomalia che rappresentano la precipitazione totale di un anno: verde per gli anni più umidi e marrone per quelli più secchi.

Le anomalie più alte registrate negli ultimi anni sono nel 2009 con un eccesso di 307,2 mm e nel 2018 con un eccesso di 270,7 mm di pioggia.

Tale dato non esclude il rischio siccità dell'area, che verrà analizzato in seguito, poiché la media dei mm di pioggia annuali potrebbero oscillare in base ad eventi di piovosità estremi.

Di seguito, il grafico in Figura 8 riporta l'indicatore "Giorni di precipitazioni intense" (giorni/anno) e cioè la media annuale del numero di giorni con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm.

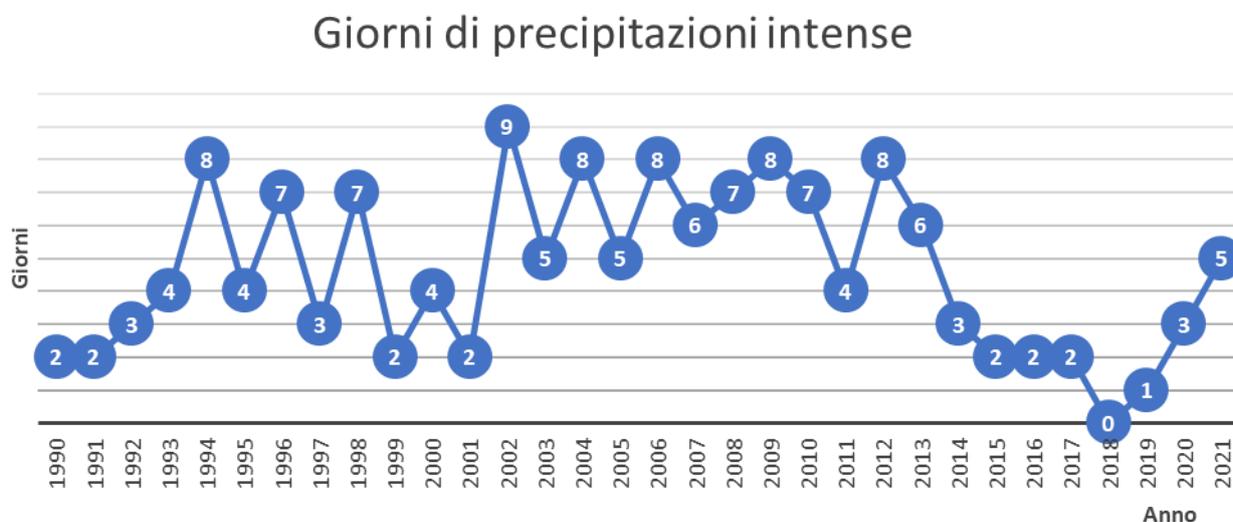


Figura 8. Giorni di precipitazioni intense" (giorni/anno) (ERA5, ECMWF).

Dal 2002 al 2013 la media osservabile è di circa 7 eventi di precipitazioni intense. La media diminuisce dal 2014 al 2019 e mostra un aumento negli ultimi anni (2020 – 2021). Di particolare interesse perché, osservando il grafico in Figura 7, questi **ultimi due anni mostrano una tendenza negativa delle precipitazioni totali medie annue con -57,8 e -39,5 mm di pioggia rispettivamente.**

Questa **tendenza negativa** si conferma anche osservando i dati disponibili per il 2022 in cui, da Gennaio a Ottobre, si registrano 231 giorni senza pioggia a confronto dei 233 giorni nello stesso periodo dell'anno 2020.

Inoltre, approfondendo la natura dei **fenomeni di precipitazioni intense** degli ultimi 4 anni (2019-2022) (Figura 9), è possibile notare come essi siano concentrati in una sola ora e siano preceduti e seguiti da giorni secchi. Tale andamento delle piogge **diminuisce la capacità drenante del terreno.**

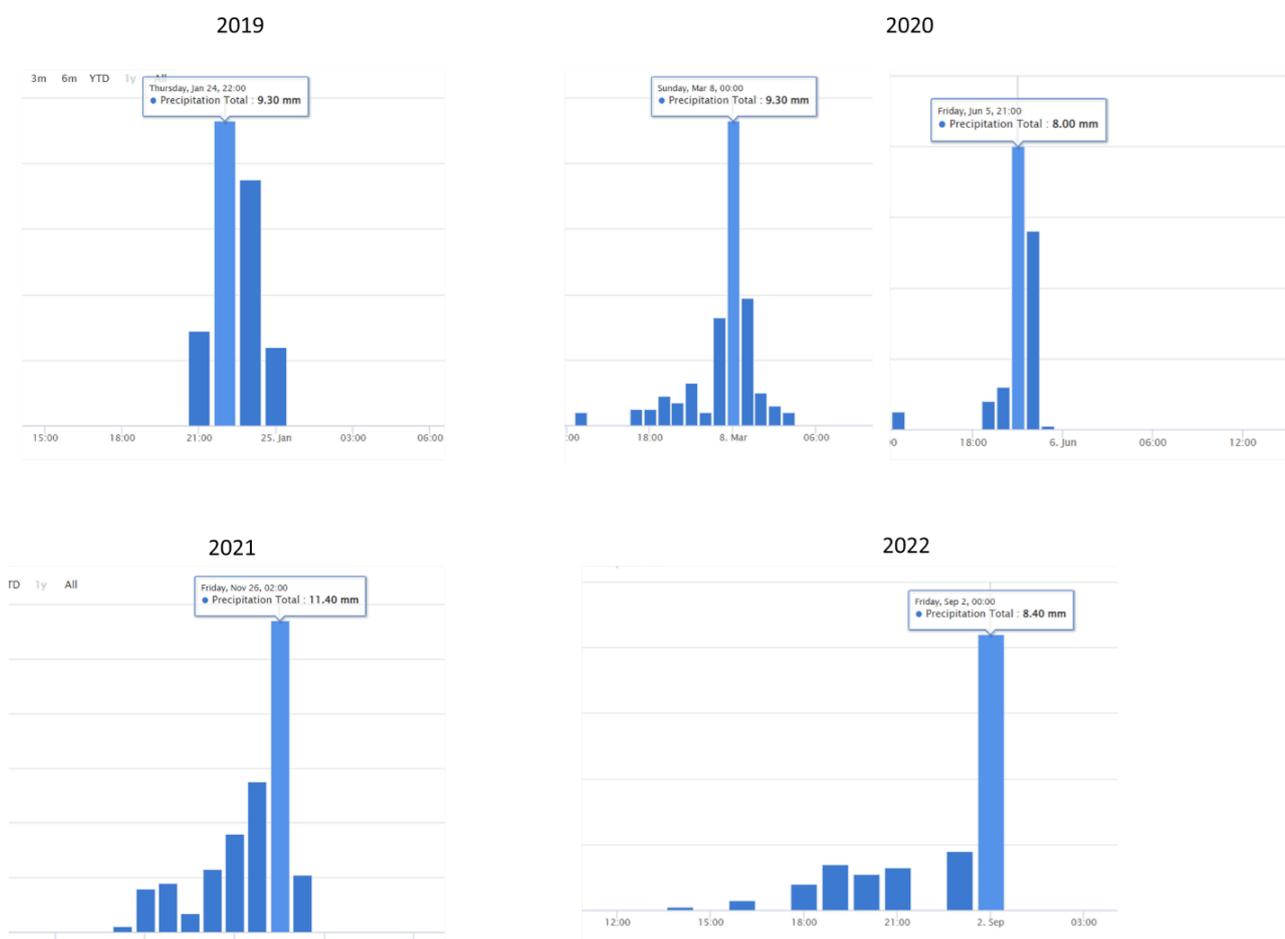


Figura 9. Fenomeni di precipitazioni intense concentrate in un arco temporale ridotto negli anni 2019-2022 (ERA5, ECMWF).

Un altro indicatore che ci consente di osservare gli effetti del cambiamento climatico in atto è l'**evapotraspirazione**, ossia l'acqua che le piante traspirano dalle foglie e il terreno rilascia con l'evaporazione.

Il grafico in Figura 10 riporta il **tasso di evapotraspirazione cumulata annuale** (mm/anno). La linea di tendenza segue coerentemente l'aumento della temperatura (Figura 6). Si osserva che, rispetto al 1990, nel 2021 il tasso di evapotraspirazione è aumentato del 44%.

Inoltre, si osserva che negli ultimi due anni, più secchi rispetto ai precedenti, il tasso di evapotraspirazione è stato comunque elevato: **1,27 e 1,11 mm rispettivamente nel 2020 e 2021 a fronte dei 0,34 mm nel 1990**. Questo è dovuto al fenomeno chiamato “*elasticità dell’evapotraspirazione al clima*”, fenomeno che indica la capacità, non immediata, di adattamento della vegetazione al cambiamento delle condizioni ambientali. In periodi di siccità, infatti, le piante possono inizialmente consumare anche più acqua del solito. Solo dopo un certo periodo di tempo insorgono i processi di adattamento.

L'aumento dell'evapotraspirazione influisce sul bilancio idrico e può portare ad un deficit di acqua sotterranea.

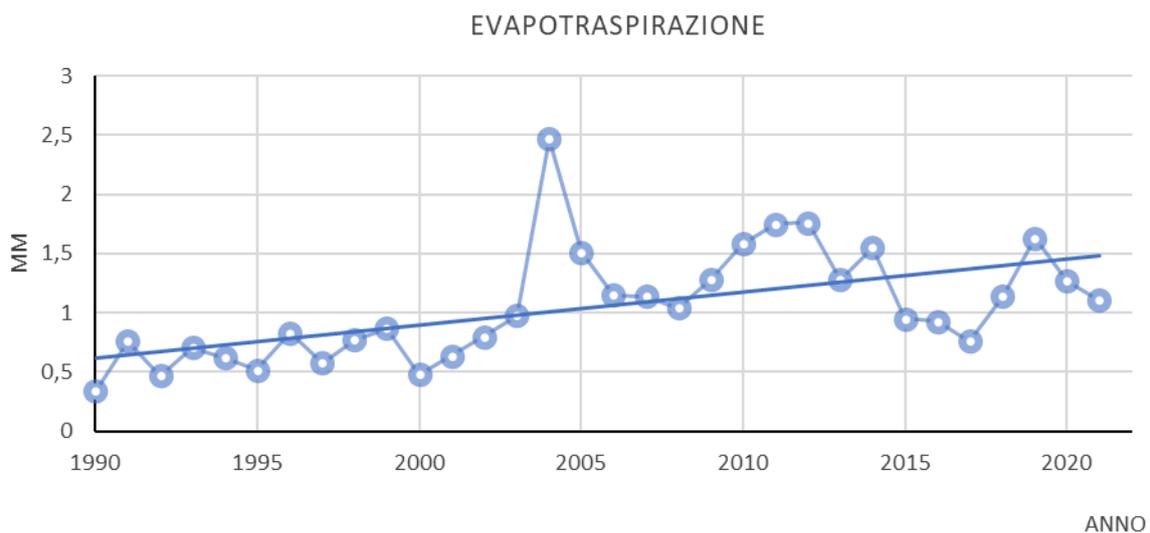


Figura 10. Evapotraspirazione cumulata annuale (mm/anno) (ERA5, ECMWF).

1.2 Indicatori climatici e analisi di rischio bi-dimensionale

Le sottosezioni precedenti hanno permesso di caratterizzare l’area di studio analizzando il dataset storico e comprendendo le attuali condizioni e modificazioni climatiche. Gli **indicatori climatici** per l’area di riferimento sono riassunti nella Tabella 2. Essa risulta caratterizzata da temperature medie elevate e da un elevato numero di giorni, in media, al di sopra della soglia selezionata per classificare i *summer days* (29,2 °C). Il regime pluviometrico, in termini di valori medi ed estremi, mostra caratteristiche intermedie, mentre il numero di giorni consecutivi senza pioggia (CDD) risulta essere elevato.

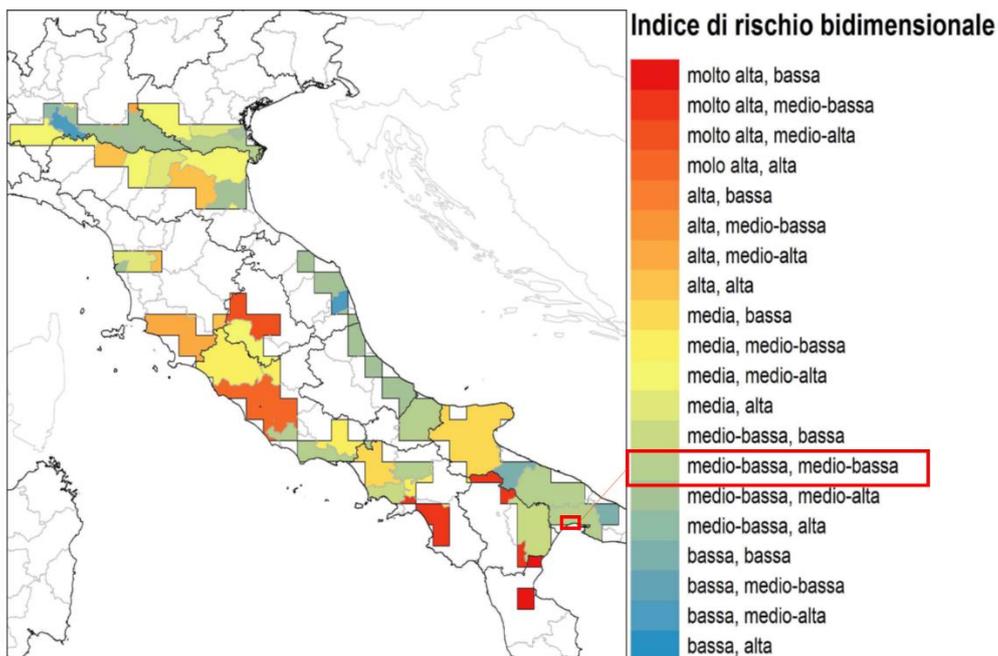
INDICATORI CLIMATICI							
							
Temperatura media annua Tmean (°C)	Precipitazioni intense R20 (n. giorni/anno con precipitazioni >20mm)	Giorni con gelo FD (n. giorni/anno con Tmean <0°C)	Giorni estivi SU95p (n. giorni/anno con Tmax > 29.2 °C)	Cumulata delle precipitazioni invernali WP (mm)	Cumulata delle precipitazioni estive SP (mm)	Evaporazione Evap Evaporazione cumulata annuale (mm/anno)	Numero massimo di giorni asciutti consecutivi CDD (giorni/anno)
17,4	5	25 (±9)*	50 (±13)*	240	90	1,1	40 (±8)*

Tabella 2. Indicatori climatici caratteristici dell'area oggetto di studio. I valori sono mediati per il dataset temporale 1990-2021 (ERA5, ECMWF). *I dati sono stati estratti dal Piano Nazionale Adattamento ai Cambiamenti Climatici, PNACC. Gli indicatori evidenziati e racchiusi nel rettangolo sono quelli più critici.

Il PNACC ha definito un indice sintetico di **rischio bi-dimensionale** per l'intero territorio nazionale combinando l'“**impatto potenziale**” (dato da pericolosità, esposizione e sensibilità) con la **capacità di adattamento**. L'indice derivato dal confronto di queste due componenti è uno strumento di indagine speditivo a scala nazionale. L'unità di aggregazione scelta per rappresentare l'indice di rischio climatico è il livello statistico NUTS3 (nomenclatura delle unità territoriali statistiche di EUROSTAT, corrispondente alle province italiane).

La prima componente per il calcolo dell'indice di rischio è la caratterizzazione della pericolosità attraverso l'analisi di una serie di indicatori che rappresentano *proxy* di eventi pericolosi (es. alluvioni, frane, ondate di calore, siccità) associati al cambiamento climatico. Gli indicatori di esposizione e sensibilità fanno invece riferimento al tessuto socio-economico (es. densità di popolazione, valore aggiunto agricolo e industriale), alla presenza di infrastrutture e aree produttive (es. reti stradali e ferroviarie, aree industriali) e alla distribuzione di risorse naturali (superficie di aree protette di interesse comunitario e nazionale). Combinando gli indicatori di pericolosità con quelli di esposizione e sensibilità è possibile ottenere una stima indicativa dei potenziali impatti associati ai cambiamenti climatici a scala provinciale. L'Indice di Capacità di Adattamento (ICA) proposto nel PNACC si basa sulla metodologia impiegata da ESPON (*European Spatial Planning Observation Network*) e utilizza cinque determinanti della capacità di adattamento: risorse economiche, conoscenza e consapevolezza, infrastrutture, capacità istituzionale e tecnologia valutate. Entrambi gli indici, indice aggregato di impatti potenziali e indice di capacità di adattamento, sono stati successivamente standardizzati ovvero trasformati in variabili di media zero e varianza pari a 1. Usando la deviazione standard come fattore discriminante sono state definite 4 classi (alta, medio-alta, medio-bassa, e bassa) per la capacità di adattamento e 5 classi per l'indice di impatto potenziale.

Secondo questa classificazione, l'area oggetto di studio ha attualmente un indice di **rischio bi-dimensionale medio basso – medio basso** (Figura 11).



		CAPACITA' DI ADATTAMENTO			
		4. ALTA	3. MEDIO-ALTA	2. MEDIO-BASSA	1. BASSA
INDICE DEGLI IMPATTI POTENZIALI	1.BASSA				
	2.MEDIOBASSA			x	
	3.MEDIA				
	4.ALTA				
	5.MOLTO ALTA				

Figura 11. Classificazione indice bi-dimensionale che combina l'impatto potenziale con la capacità di adattamento (PNACC).

2. Analisi dei rischi climatici fisici

Partendo dalle condizioni climatiche attuali dell'area, questa sezione riporta le **proiezioni climatiche valutate per identificare i rischi climatici fisici**; gli impatti sono stati valutati sulla base delle migliori pratiche e degli orientamenti disponibili e tenendo conto delle più attuali conoscenze scientifiche per l'analisi della vulnerabilità e del rischio e delle relative metodologie adottate dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico⁷.

2.2 Proiezioni climatiche future

La valutazione dei rischi fisici dell'area è effettuata utilizzando proiezioni climatiche avanzate alla massima risoluzione disponibile nella serie esistente di scenari futuri coerenti con la durata prevista dell'attività. In particolare, sono stati considerati gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5⁸ che corrispondono a due dei quattro *Representative Concentration Pathways* (RCP) che la comunità scientifica

⁷ Relazioni di valutazione sui cambiamenti climatici relative a impatti, adattamento e vulnerabilità, pubblicati periodicamente dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC), l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione delle informazioni scientifiche prodotte relativamente al cambiamento climatico, <https://www.ipcc.ch/reports/>.

⁸ Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, et al (2011) *The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300*. *Clim Change* 109:213-241

Moss R, Babiker M, Brinkman S, et al (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland Mrozinski RD, Cromley

internazionale⁹ ha selezionato per rappresentare l'evoluzione delle concentrazioni future di gas ad effetto serra del nostro pianeta. Gli scenari selezionati sono i due più comunemente utilizzati in quanto rappresentano rispettivamente livelli di emissioni intermedi e alti cui corrispondono incrementi di temperatura medi globali a fine secolo al di sotto dei 2 °C e dei 4 °C rispettivamente.

Le proiezioni climatiche future del modello selezionato, di cui si riportano in Tabella 3 le anomalie medie di temperatura e precipitazione per il periodo 2021-2050 e per il periodo 2071-2100, sono state utilizzate per il calcolo delle anomalie degli stessi indicatori utilizzati per la caratterizzazione del clima attuale (Tabella 2).

RCP 4.5						
						
Temperatura media annua Tmean (°C)	Precipitazioni intense R20 (n. giorni/anno con precipitazioni >20mm)	Giorni con gelo FD (n. giorni/anno con Tmean <0°C)	Giorni estivi SU95p (n. giorni/anno con Tmax > 29.2°C)	Cumulata delle precipitazioni invernali WP mm (%)	Cumulata delle precipitazioni estive SP mm (%)	Evaporazione Evap Evaporazione cumulata annuale (%)
1,2	0	-6	12	-5	-18	-3
RCP 8.5						
1,5	0	-10	14	-4	14	-8

Tabella 3. Anomalie principali degli indicatori climatici secondo i modelli rappresentativi RCP 4.5 e RCP 8.5. I dati sono stati estratti dal Piano Nazionale Adattamento ai Cambiamenti Climatici, PNACC. I numeri positivi segnano un aumento i numeri negativi una diminuzione del valore dell'indicatore riportato in Tabella 2.

Nello scenario RCP 4.5 si evidenzia una riduzione sia delle precipitazioni estive che di quelle invernali e si ha un aumento significativo dei giorni estivi con un aumento della Tmean di 1.2 °C. Nello scenario 8.5 l'area è caratterizzata da un aumento complessivo dei fenomeni di precipitazione estivi. Si riscontra un ulteriore aumento significativo dei giorni estivi, come per lo scenario RCP4.5.

2.3 Livello di impatto potenziale

In accordo con il PNACC l'area di studio rientra in un'ampia macroregione con **valori di propensione al rischio per il periodo 2021-2050 alti e medio-alti** definiti da **impatti potenziali molto alti e bassa capacità di adattamento**.

Gli *stressor* climatici più rilevanti per l'area sono le ondate di calore e l'intensificarsi degli eventi di precipitazione estremi, che si accompagnano ad una generalizzata riduzione delle precipitazioni nel periodo estivo. Potenziali impatti climatici di particolare rilievo saranno quelli sulla salute, derivanti dalle patologie legate all'aumento delle temperature, incluse le ondate di calore. Inoltre, l'aumento della temperatura porterà ad un incremento dell'aridificazione (perdita umidità dei suoli) nelle aree agricole, forestali e pastorali e ad un aumento del rischio di incendi soprattutto in zone forestali non gestite e in aree abbandonate. L'aumento degli episodi di siccità porterà ad una riduzione della disponibilità idrica.

⁹ IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Stocker TF, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA), pp 1-30

Per approfondire gli *stressor* climatici che porteranno ad un aumento del rischio nell'area indagata sono stati utilizzati i seguenti strumenti: *ThinkHazard!*¹⁰, un modello web-based sviluppato dal *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* e la piattaforma *Climate-ADAPT*¹¹ sviluppata dalla Commissione Europea e dall'Agenzia Europea dell'Ambiente.

La Tabella 4 riporta una panoramica degli *stressor* climatici approfonditi, dei livelli di pericolo associati, delle minacce e del livello di rischio che ne consegue.

STRESSOR CLIMATICI	LIVELLO DI PERICOLO	MINACCE	LIVELLO DI RISCHIO
ALTE TEMPERATURE	Moderato	Desertificazione Salute Umana Risorse idriche Foreste	ALTO
PRECIPITAZIONI INTENSE	Moderato		
SICCITA'	Moderato		
INCENDI	Alto		

Tabella 4. Rischi climatici fisici e livelli di pericolo riferiti a proiezioni future nell'area di studio.

2.3.1 Alte temperature

Le alte temperature sono probabilmente il pericolo climatico più urgente per le città in termini di rischi per la vita umana. Il calore influisce sul benessere e può essere letale per gli anziani e le persone in gravi condizioni di salute, in particolare quando si verificano lunghi periodi di giorni caldi e notti calde (ondate di calore)¹². Secondo il sesto rapporto di valutazione del gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici¹³ le continue emissioni di gas serra causeranno un ulteriore riscaldamento, ed è praticamente certo che nei prossimi cinquant'anni ci saranno più frequenti estremi di temperatura calda sulla maggior parte delle aree terrestri. Il riscaldamento non sarà uniforme a livello regionale.

Nell'area interessata dal progetto, l'aumento della temperatura nei prossimi cinquant'anni sarà leggermente superiore alla media mondiale. Sarebbe perciò prudente dotare i progetti in quest'area di misure di mitigazione e adattamento al riscaldamento globale.

Il pericolo di calore estremo nell'area di studio è classificato come **moderato** in base alle informazioni sul calore attualmente disponibili nel modello *ThinkHazard!* e questo significa che c'è più del 25% di possibilità che almeno un periodo di esposizione prolungata al calore estremo, con conseguente stress da calore, si verifichi nei prossimi cinque anni.

Il modello *ThinkHazard*, nella stima di tale rischio climatico, calcola l'indice *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT, in °C) e più precisamente il massimo giornaliero WBGT. Tale indice è una misura dello stress termico alla luce diretta del sole e tiene conto di: temperatura, umidità, velocità del vento, angolo del sole e copertura nuvolosa (radiazione solare). Ha un'ovvia rilevanza per la salute umana ed è rilevante in tutti i tipi di progetti e settori, compresi quelli relativi alle infrastrutture. Gli studi sullo

¹⁰ GNU General Public Licence, Version 3, 29 June 2007

¹¹ <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

¹² EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

¹³ IPCC, 2021: *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press*

stress da calore nella letteratura scientifica che fanno uso del WBGT applicano soglie di 28°C e 32°C per classificare il rischio di stress da calore. Le soglie di intensità del danno sono applicate seguendo questa definizione: stress da calore lieve/basso (<28°C), moderato/alto (28-32°C) e grave/molto alto (>32°C).

In Figura 12 è riportata la proiezione su 20 anni della distribuzione dell'indice WBGT in una sezione della Puglia vicina all'area di interesse. Il **valore di WBGT** nella zona di interesse è di **27,5: stress da calore moderato**.

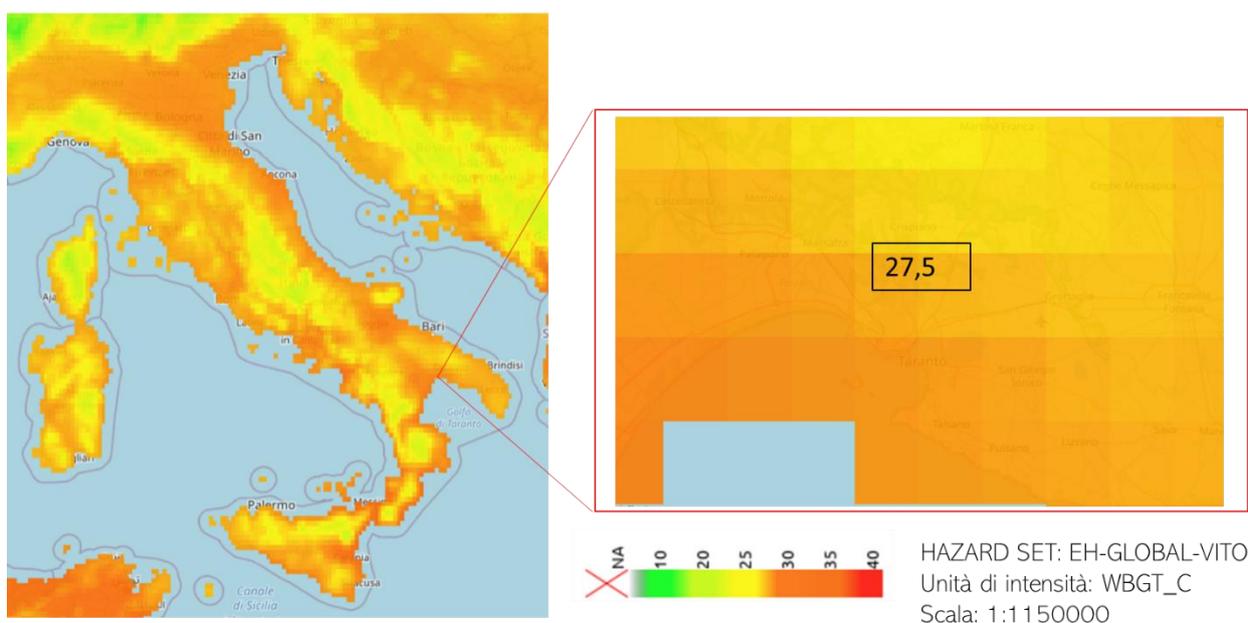


Figura 12. Distribuzione spaziale dell'indice WBGT in una proiezione futura di 20 anni secondo la stima del modello ThinkHazard!.

2.3.2 Precipitazioni intense

I cambiamenti previsti nelle precipitazioni intense (espressi in percentuale) in inverno (dicembre, gennaio, febbraio) sono stati calcolati a partire dai dati EURO-CORDEX: "*Climate change projections for Europe based on an ensemble of regional climate model simulations provided by the EURO-CORDEX initiative*" per lo scenario RCP8.5. Le simulazioni del modello climatico regionale CORDEX per il dominio europeo (EURO-CORDEX) sono condotte a due diverse risoluzioni spaziali, la risoluzione generale CORDEX di 0,4 gradi (EUR-44, ~50 km) e in aggiunta la risoluzione più fine di 0,11 gradi (EUR-11, ~12,5 km), quest'ultima utilizzata in questo set di dati¹⁴.

In Figura 13 è riportata la previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 basato sulla media dei risultati di diversi modelli climatici regionali annidati in diversi modelli di circolazione generale.

Per l'area di riferimento il **livello di pericolo** è **moderato** con un **aumento previsto delle precipitazioni intense invernali del 19,9%**.

¹⁴ <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>.



Figura 13. Previsione dei cambiamenti nelle precipitazioni intense (in %) in inverno dal 1971-2000 al 2071-2100 per lo scenario RCP 8.5 (EURO-CORDEX). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

2.3.3 Siccità

Nell'area d'interesse il **livello di pericolo di siccità** è classificato, secondo i modelli regionali europei, come **moderato**. Ciò significa che c'è fino al 20% di possibilità che si verifichino condizioni di siccità nei prossimi 10 anni.

La Figura 14 riporta la previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5, ottenuta con il set di dati delle simulazioni dei modelli climatici regionali fornite da EURO-CORDEX.

La siccità meteorologica si basa sull'indice di precipitazione standardizzato per tre mesi (SPI-3). Le tendenze passate si basano sui dati di precipitazione del dataset grigliato E-OBS¹⁵ mentre le proiezioni si basano su un insieme di modelli del progetto EURO-CORDEX per due scenari di emissioni RCP.

Le tendenze della siccità idrologica sono calcolate in base al deflusso durante il mese più secco nel dataset E-RUN¹⁶ che impiega un modello statistico per stimare il deflusso in tutta Europa, basato sul più grande database di osservazioni di flusso e sul dataset E-OBS. Le proiezioni sulla siccità idrologica si basano sul deficit idrico fluviale a 10 anni, calcolato dal modello idrologico LISFLOOD¹⁷ forzato da un insieme di modelli del progetto EURO-CORDEX.

Nell'area oggetto di studio la frequenza probabile di eventi siccitosi nei prossimi 30 anni è compresa tra 3 e 4 eventi.

¹⁵ <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download-charme.php>

¹⁶ https://store.pangaea.de/Publications/Gudmundsson-Seneviratne_2016/e-run_v1.1.nc

¹⁷ Natural Hazards Project of the Joint Research Centre of the European Commission

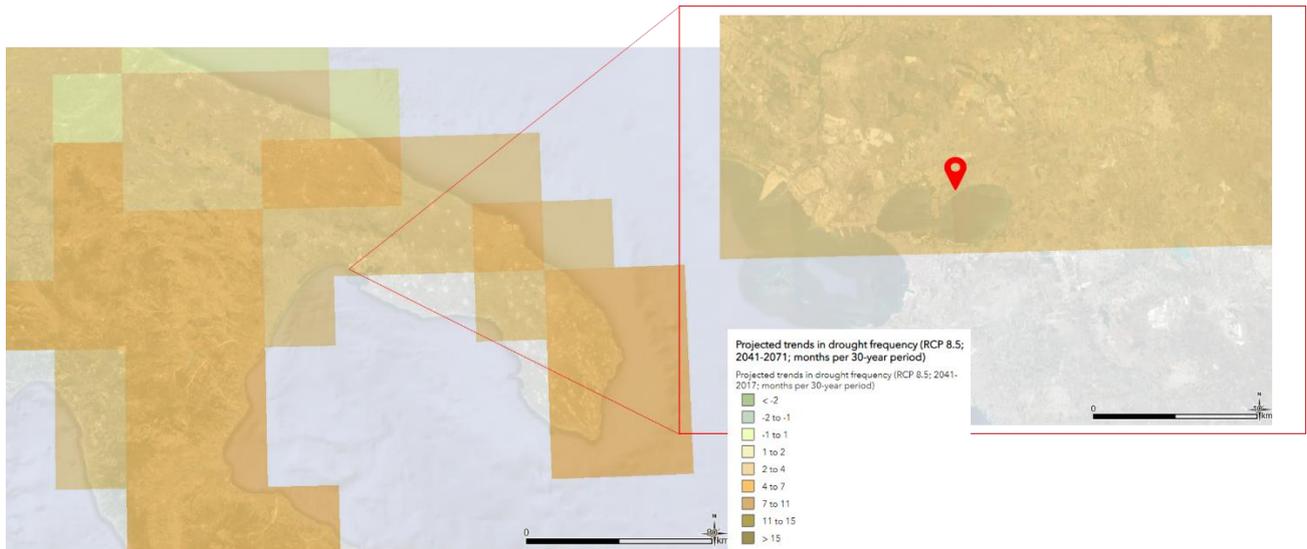


Figura 14. Previsione della frequenza di eventi siccitosi in 30 anni per lo scenario RCP 8.5 (*Climate-ADAPT*). L'area di studio è indicata con un quadrato rosso.

2.3.4 Incendi

Il rischio di incendi ai margini di molte città europee sta crescendo a causa del verificarsi più frequente di ondate di calore e siccità. Il più alto rischio di incendi si verifica nei paesi dell'Europa meridionale, in particolare in Portogallo, Spagna, Francia meridionale, Italia meridionale e Grecia, dove nel 2018 quasi 100 persone hanno perso la vita in incendi nella zona costiera dell'Attica¹⁸.

Il rischio incendi viene calcolato nel modello *ThinkHazard!* attraverso l'indice *Canadian Fire Weather Index* (FWI) che è il sistema di classificazione del pericolo di incendio più usato a livello mondiale. Il FWI integra diversi fattori meteorologici che influenzano la probabilità che un incendio di una copertura vegetativa si accenda e si diffonda. L'indice si basa su misurazioni istantanee (o previsioni) di temperatura, umidità relativa e velocità del vento. Inoltre, lo storico delle precipitazioni a lungo termine viene usato per valutare la secchezza del materiale combustibile disponibile e dunque per valutare il livello di diffusione del fuoco.

In *ThinkHazard!* le soglie di intensità dannose sono: alta: FWI >30; media: 30 < FWI < 20; bassa: FWI < 20.

Nell'area di interesse il pericolo di incendi è classificato come **alto** secondo le informazioni attualmente disponibili e valutando i prossimi 10 anni, con un indice **FWI** di circa **133**. Questo significa che c'è più del 50% di possibilità che si sviluppi un incendio significativo.

3. Analisi modellistica degli impatti dell'opera sul microclima

Nell'ambito del *Recovery and Resilience Facility* RRP (Regolamento (UE) 2021/241), la produzione di elettricità da pannelli solari è considerata un'attività che contribuisce in modo sostanziale all'obiettivo della mitigazione dei cambiamenti climatici. La diffusione di dette tecnologie è infatti ritenuta necessaria per un'economia climaticamente neutra e per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per il 2030 e 2050. Tuttavia, per garantire il rispetto del contributo

¹⁸ EEA Report No 1/2017 *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*

sostanziale alla mitigazione dei cambiamenti climatici e la significativa riduzione di emissioni di gas a effetto serra, le linee guida della Commissione Europea previste dal RRP dispongono l'adozione di tutte le **strategie** disponibili perché la **produzione di elettricità da pannelli solari sia efficiente**.

La produzione di energia rinnovabile attraverso moduli fotovoltaici è strettamente dipendente dalle variabili meteorologiche in termini di efficienza energetica dell'impianto. L'efficienza riportata dai produttori di pannelli solari si riferisce alle prestazioni in condizioni di test standard (STC) solitamente con un irraggiamento di 1000 W/m² e una temperatura delle celle di 25 °C (IEC, 2016). Tuttavia, in condizioni operative reali, la temperatura del modulo è spesso superiore a 25 °C, causando un'efficienza energetica inferiore. Secondo Bücher (1997) per le celle in silicio cristallino, la caduta dell'efficienza, che è descritta dal coefficiente di temperatura (β_{ref}), è circa 0,4 % per ogni °C di aumento della temperatura della cella al di sopra della temperatura di riferimento STC. A seconda del periodo dell'anno, questo può portare a diminuzioni nella produzione di energia fino al 30% in meno di quanto ci si aspetta dalle condizioni STC.

I rischi fisici legati al clima che potrebbero pesare sulla misura sono stati valutati in un'analisi dell'esposizione, riguardante sia il clima attuale che quello futuro (vedi sez. 1 e 2), dalla quale è emerso che nell'area di studio non sussistono attualmente criticità climatiche e che la stessa non è soggetta a condizioni di stress termico estreme ma, analizzando le proiezioni future, essa si troverà esposta a ondate di calore e sarà soggetta a eventi siccitosi.

Considerati dunque gli scenari climatici futuri, gli obiettivi principali della seguente fase di studio sono: (i) calcolare la variazione dei parametri microclimatici nello scenario di progetto valutando l'impatto ambientale climatico dell'opera e di ciascuna misura adottata nel progetto rispetto ad una situazione senza alcun impatto ambientale¹⁹, (ii) elaborare le più efficaci soluzioni di adattamento e mitigazione.

3.1. Studio modellistico: ENVI-met

ENVI-met è un modello microclimatico prognostico tridimensionale ad alta risoluzione²⁰ basato sulle leggi fondamentali della fluidodinamica e della termodinamica, che risolve nell'elaborazione dei dati le equazioni di Navier-Stokes (www.envimet.com). Il modello è progettato per indagare sui processi che avvengono alla microscala con una risoluzione orizzontale che va da 0.5 a 10 m e un intervallo di tempo che varia dalle 24 h alle 48 h, con un intervallo temporale compreso tra 1 s e 5 s. Questa risoluzione consente di analizzare le interazioni su piccola scala tra singoli edifici, superfici e vegetazione.

Nello specifico il modello considera:

- flussi di radiazione su uno spettro che va dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione dagli edifici e dalla vegetazione;
- traspirazione, evaporazione e flusso di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- tutti i parametri fisici della pianta;

¹⁹ L'approccio è in linea con la logica del regolamento *Tassonomia (Regolamento (UE) 2020/852)* ed è ulteriormente corroborato dal principio di precauzione e scaturisce dalla necessità di considerare un sanno all'ambiente da una prospettiva assoluta e non relativa.

²⁰ Bruse M., Fleer H., 1998. *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environment Modelling & Software* 13, 373–384.

- la temperatura superficiale e la temperatura delle superfici;
- gli scambi di acqua e di calore all'interno del sistema suolo, compreso l'assorbimento di acqua delle piante;
- rappresentazione 3D della vegetazione inclusa la modellizzazione dinamica del bilancio idrico delle singole specie;
- dispersione di gas e particelle. Il modello supporta particelle (inclusi sedimentazione e deposizione su foglie e superfici), gas inerti e gas reattivi del ciclo di reazione NO-NO₂-O₃;
- indici biometeorologici come la temperatura media radiante (MRT, *temperatura media radiante*), e il PET (*temperatura fisiologica equivalente*).

Attraverso un approccio olistico, il modello considera l'ambiente come un unico organismo in cui tutti i diversi elementi di un ambiente urbano o il paesaggio e la vegetazione interagiscono tra loro. ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di *urban-design* e *land planning* in quanto è in grado di simulare in modo preventivo gli effetti dovuti a determinate azioni fornendo previsioni utili e numeriche sull'impatto ambientale di nuove strutture o aree verdi.

3.1.1. Metodologia e set-up modellistico

Sono stati analizzati **4 scenari** (Tabella 6) attraverso il modello di fluidodinamica computazionale (CFD) ENVI-met: **scenario 0** (area senza vegetazione), **scenario 1 attuale** (ambiente allo stato di fatto), **scenario 2 fotovoltaico** (moduli fotovoltaici), **scenario 3 fotovoltaico + azioni di ripristino (fascia a macchia/bosco)**.

Lo scenario 0 non rientra tra gli scenari di progetto ma è stato simulato per un confronto e una stima più accurata dello scenario attuale e per quantificare l'effetto microclimatico della vegetazione attuale rispetto ad uno scenario peggiorativo.

L'area analizzata (Figura 15) è solo una parte dell'area soggetta a progetto e, nello specifico, è stata data priorità all'area della Polveriera Nord (Figura 15a, riquadro verde) perché più complessa e con presenza di vegetazione, con il fine di escludere qualsiasi impatto negativo. I risultati possono essere replicati nelle altre aree di progetto.

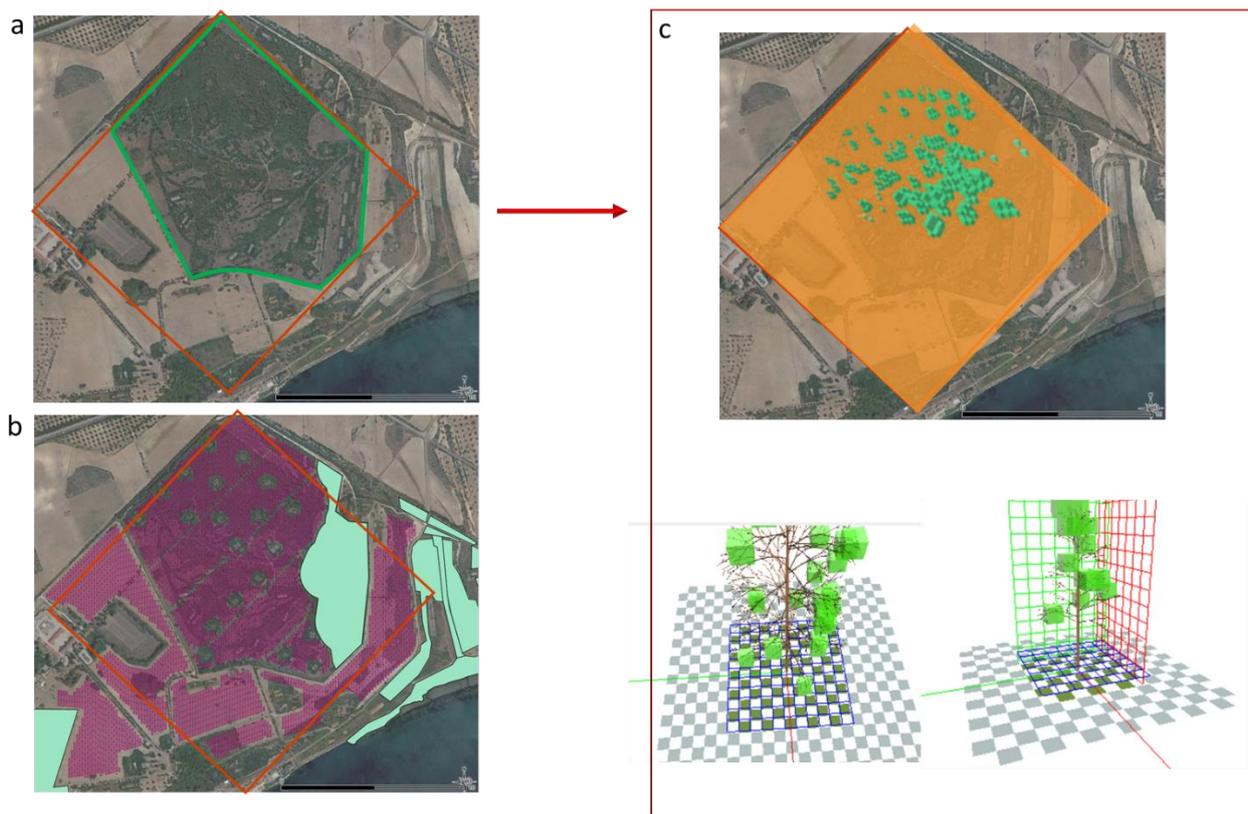


Figura 15. Area di studio evidenziata nel riquadro rosso e nello specifico a) rilievo satellitare dell'area di studio e, evidenziata nel riquadro verde, l'area della Polveriera Nord; b) in viola l'area di progetto del fotovoltaico e in celeste l'area soggetta ad azioni di ripristino; c) ricostruzione dell'area attuale con ENVI-met e dettaglio tridimensionale degli alberi inseriti nell'area della Polveriera Nord.

La metodologia e il processo investigativo del seguente studio sono stati validati scientificamente in pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali con *peer-review*²¹.

Il set-up del modello ENVI-met è riportato in Tabella 6. Le simulazioni svolte hanno avuto una durata di 16 h in totale. L'area simulata in 3D (dominio computazionale) ha una dimensione di 1 km (orizzontale) x 1 km (verticale), con un'altezza verticale di 40 m. Il dominio computazionale è stato suddiviso con una griglia di risoluzione 2 m x 2 m x 2 m con eccezione delle prime 5 celle (vicine al suolo) aventi una risoluzione verticale di 0.4 m. Per migliorare l'accuratezza e stabilità del modello sono state aggiunte 10 *nesting grids* al contorno. La temperatura oraria e l'umidità relativa sono state "forzate" in ingresso per guidare la simulazione. Nello specifico, l'input meteorologico orario è stato ottenuto dai dati meteorologici estratti con ERA5 (ECMWF). È stato scelto il giorno più caldo estivo (giugno-luglio-agosto) dell'anno 2021, la media della velocità del vento e la mediana della direzione del vento.

²¹ Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perronce, L., Santiago, J.L., 2020. Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland). *Forests*, 11, 228.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perronace, L., Santiago, J., 2021a. The Challenge in the Management of Historic Trees in Urban Environments during Climate Change: The Case of Corso Trieste (Rome, Italy). *Atmosphere*, 12, 500.

Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O. S., Santiago, J.L., Aarrevaara, E., Emmanuel, R., Buccolieri, R., 2021b. Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy). *Climate*, 9, 116.

Semeraro, T., Aretano, R., Barca, A., Pomes, A., Del Giudice, C., Gatto, E., Lenucci, M., Buccolieri, R., Emmanuel, R., Gao, Z., Scognamiglio, A., 2020. A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems. *Land*, 9, 238.

		METEOROLOGIA settata nel modello	MISURE DI COMPENSAZIONE E MITIGAZIONE
SENZA VEGETAZIONE	SCENARIO 0 	Giorno simulato: 20 Luglio 2021 Media Temperatura dell'aria: 28 °C	Nessuna.
ATTUALE	SCENARIO 1 	Valore massimo Temperatura dell'aria: 34 °C Media Umidità relativa: 65 %	Nessuna.
OPERA	SCENARIO 2 	Valore massimo Umidità relativa: 81 % Velocità del vento: 1.50 m/s Direzione del vento: 360°	Nessuna.
OPERA + AZIONI DI RIPRISTINO	SCENARIO 3 		Fascia a macchia/bosco

Tabella 6. Scenari investigati con set-up delle condizioni meteorologiche al contorno.

3.1.2. Parametri investigati

3.1.2.1. Microclima

L'impatto sul **microclima** è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari strategici e di progetto in termini di **albedo**, **temperatura dell'aria (Tair °C)**, **umidità relativa (RH, %)**, **temperatura media radiante (MRT, °C)** e **percentuale di umidità al suolo rispetto a saturazione (RH suolo, %)**. Lo studio di specifici indici (temperatura media radiante, *temperatura fisiologica equivalente PET*) ha permesso invece di valutare l'impatto delle scelte progettuali sul comfort termico.

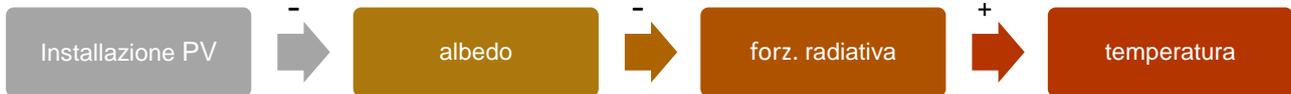
3.1.2.2. Albedo e inquinamento termico

Con il termine **albedo** si indica il rapporto tra la quantità di radiazione solare riflessa e quella incidente ed è solitamente espresso come una percentuale o un valore decimale, con 1 che indica un riflettore perfetto e 0 che indica un materiale che assorbe tutta la luce in ingresso.

I pannelli fotovoltaici (PV) utilizzano rivestimenti antiriflesso e superfici strutturate per massimizzare la radiazione solare in entrata assorbita dalla cella e minimizzare la quantità di radiazione riflessa e presentano valori di albedo piuttosto bassi: in laboratorio si può scendere fino allo 0.01, ma valori più

realistici ricavabili da installazioni reali si aggirano attorno allo 0.10²². Di contro, secondo i valori di albedo riportati dalla norma UNI 8477, l'albedo di un terreno incolto si aggira intorno allo 0.30.

Quindi, la copertura di terreno con pannelli fotovoltaici riduce l'albedo della superficie terrestre, aumentando così la forzante radiativa e, in ultima analisi, aumentando la temperatura.



Per tale ragione si è ritenuto necessario quantificare la variazione di albedo tra gli scenari col fine di quantificare l'impatto termico delle soluzioni adottate. L'albedo assegnato ai pannelli fotovoltaici all'interno del dominio computazionale è di 0.10 mentre l'albedo del terreno è di 0.30.

3.1.2.3. *Indici di comfort termico: Temperatura media radiante MRT*

La MRT è definita come “la temperatura di un involucro nero uniforme che scambia la stessa quantità di calore per irraggiamento con l'occupante dell'ambiente reale” (ASHRAE 55-92²³). Essa è espressa dalla formula²⁴:

$$MRT = [(T_g + 273.15)^4 + \frac{1335 \times 10^8 v^{0.71}}{\epsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_{air})]^{\frac{1}{4}} - 273.15$$

dove T_g = temperatura di bulbo umido (°C); v = velocità del vento (ms^{-1}); T_{air} = temperatura dell'aria (°C); D = diametro del globo (m) = 44 mm e ϵ = emissività del globo. Il modello ENVI-met simula accuratamente i valori di picco della MRT diurna²⁵, una caratteristica di grande importanza quando si tratta dell'indagine sull'analisi del **comfort termico**; essa considera tutti i flussi di radiazione a onde corte e lunghe, sia quelli emessi dalla radiazione solare, che quelli provenienti da ambienti con temperature superficiali differenti e la sua distribuzione spaziale risulta influenzata dalla posizione e dal modello spaziale della vegetazione.

3.1.2.4. *Indici di comfort termico: Temperatura fisiologica equivalente PET*

Il PET è un indice di comfort termico basato su un modello prognostico del bilancio energetico umano che calcola la temperatura della pelle, la temperatura del nucleo corporeo, il tasso di sudorazione e, come variabile ausiliaria, la temperatura degli indumenti²⁶.

²² Nemet G. F., 2009. Net Radiative Forcing from Widespread Deployment of Photovoltaics. *Environmental science & technology*, 43, 2173-2178.

²³ American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) 1992. Standard 55-92: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, Georgia

²⁴ Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, 983-1993

²⁵ Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perronce, L., Santiago, J.L., 2020. Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland). *Forests*, 11, 228.

²⁶ Höppe, P. 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71-75.

Si basa sul *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI) che definisce l'equazione del corpo umano come:

$$M + W + R + C + ED + ERe + ESw + S = 0$$

dove M è l'attività metabolica, W è il lavoro fisico prodotto, R è la radiazione netta del corpo, C è il flusso di calore convettivo, ED è il flusso di calore latente che si diffonde attraverso la pelle sotto forma di vapore acqueo, ERe è la somma dei flussi di calore per il riscaldamento e l'umidificazione dell'aria inspirata, ESw è il flusso di calore dovuto all'evaporazione del sudore, S è il flusso di calore di accumulo per il riscaldamento o il raffreddamento della massa corporea. Tutti i valori sono espressi in *watt*. Il PET si presta bene alla valutazione della componente termica di diversi climi. È preferibile ad altri indici termici per la sua unità di misura (°C), che rende i risultati più comprensibili e in linea con la moderna terminologia biometeorologica umana.

L'indice PET è stato calcolato da ENVI-met che ha rielaborato i flussi di radiazione all'interno dell'area investigata, la temperatura dell'aria, la velocità del vento e la radiazione solare.

I valori di PET e le corrispondenti percezioni termiche sono indicati nella Tabella 7.

SCALA DI VALORI (PET °C)	PERCEZIONE TERMICA
<4	Molto freddo
4-8	Freddo
8-13	Fresco
13-18	Fresco moderato
18-23	Neutro
23-29	Caldo leggero
29-35	Caldo moderato
35-41	Molto caldo
>41	Caldo estremo

Tabella 7. Scala di percezione termica PET

3.2. Risultati

3.2.2. Micrometeorologia e Comfort termico

La Tabella 8 riporta le medie spaziali di *Albedo*, *Tair*, *RH*, *RH del suolo*, *MRT* e *PET*, alle 15:00, orario in cui si registra il valore massimo di temperatura e in cui è possibile stimare il miglior contributo delle soluzioni di adattamento previste. I dati di *albedo* sono stati estratti ad altezza 0 mentre i dati di *Tair*, *RH*, *MRT* e *PET* ad altezza pedestre pari a 1.4m.

	Albedo	Tair (°C)	RH (%)	RH del suolo (%)	MRT (°C)	PET (°C)
SCENARIO 0	0,24	26,79	59,74	20,72	53,15	36,06 (caldo estremo)
SCENARIO 1	0,22	26,56	60,97	27,43	52,83	35,63 (Molto caldo)
SCENARIO 2	0,22	26,46	61,12	28,05	50,59	34,74 (caldo moderato)
SCENARIO 3	0,21	26,23	61,21	29,51	51,24	33,13 (caldo moderato)

Tabella 8. Media spaziale dei parametri investigati nei diversi scenari alle 15:00. La riga dello scenario attuale è completamente evidenziata per meglio evidenziarne le differenze con lo scenario peggiorativo (scenario 0) e gli scenari di progetto (2 e 3).

Come si può osservare, le medie spaziali mostrano una diminuzione di albedo di 0,02 passando dallo scenario di confronto senza vegetazione (scenario 0) allo scenario attuale (scenario 1). I valori medi di albedo rimangono invece invariati passando dallo scenario 1 (scenario attuale) allo scenario 2 e diminuiscono di 0,01 passando allo scenario di fotovoltaico + azioni di ripristino). La vegetazione, infatti, assorbe più radiazioni solari e riflette meno di questa radiazione verso l'esterno riducendo l'albedo.

Per verificare l'impatto dell'effetto albedo sull'inquinamento termico, l'indagine è stata approfondita con l'analisi dei valori spaziali di **Tair** e **RH**.

Osservando i **valori della temperatura**, dal confronto con lo scenario peggiorativo, emerge che la presenza di vegetazione attualmente porta ad un miglioramento dei valori della temperatura dell'aria di **0,23 °C**. Si osserva poi una **diminuzione** in tutti gli scenari di progetto confrontando i valori con quelli dello scenario attuale. Nello scenario fotovoltaico (scenario 2) si registra una diminuzione media spaziale di **0,10 °C**. Tale diminuzione aumenta nello scenario 3 dove la presenza della vegetazione mitiga la temperatura portando ad una differenza di **0,33 °C** rispetto allo scenario attuale.

I **valori di umidità relativa aumentano** in tutti gli scenari di progetto. Tale dato è strettamente correlato all'aumento della percentuale di umidità al suolo. Il maggior ombreggiamento, dovuto principalmente alla presenza di pannelli solari, trattiene maggiori concentrazioni di acqua e porta ad un aumento dell'umidità relativa dell'aria nelle zone sottostanti i moduli. Tale aumento della RH in atmosfera è pari a **0,15%** nello scenario fotovoltaico e a **0,24%** nello scenario fotovoltaico + azioni di ripristino. La concentrazione di umidità nel suolo, invece, aumenta di **0,62%** nel fotovoltaico e di **2,08%** nello scenario con azioni di ripristino.

L'effetto positivo dell'ombreggiamento è maggiormente confermato dal calcolo dell'indice MRT la cui misura dipende strettamente dallo stesso. In generale si osserva un miglioramento della MRT **negli scenari di progetto con una diminuzione massima di 2,24 °C nello scenario 3. Si ha conferma del miglioramento del comfort termico dall'analisi dell'andamento del PET.** Si passa, infatti, dalla percezione termica di "**molto caldo**" dello scenario attuale alla percezione di "**caldo moderato**" nello scenario fotovoltaico e fotovoltaico con azioni di ripristino con una diminuzione registrata è di **0,89** e **2,50 °C** rispettivamente.

Quanto emerso dai risultati rivela che **l'effetto dell'albedo** sul comfort termico è mitigato dall'effetto della copertura arborea²⁷ e dalla stessa presenza dell'impianto fotovoltaico che, per effetto dell'ombreggiamento, riduce la temperatura e aumenta la concentrazione di acqua nel suolo. Perciò, per i valori di albedo considerati e per gli scenari investigati, la diminuzione dell'albedo **non comporta un rischio di inquinamento termico**.

La Tabella 9 riassume le differenze dei valori medi spaziali dei parametri investigati degli scenari simulati di progetto (scenario 2 e 3) e dello scenario peggiorativo (scenario 0) rispetto allo scenario attuale.

I risultati evidenziati in verde sono positivi alla luce dei rischi climatici riscontrati per l'area di studio e cioè portano ad un miglioramento delle condizioni microclimatiche dell'area e le azioni di ripristino migliorano ulteriormente la resilienza climatica locale a garanzia del principio di *climate proofing*.

	Albedo	Tair (°C)	RH (%)	RH del suolo (%)	MRT (°C)	PET (°C)
SCENARIO 0	+0,02	+0,23	-1,23	-6,71	+0,32	+0,43
SCENARIO 1	0,22	26,56	60,97	27,43	52,83	35,63
SCENARIO 2	-	-0,10	+0,15	+0,62	-2,24	-0,89
SCENARIO 3	-0,01	-0,33	+0,24	+2,08	-1,59	-2,50

Tabella 9. Differenza dei valori medi spaziali dei parametri investigati degli scenari simulati di progetto (scenario 2 e 3) e dello scenario peggiorativo (scenario 0) rispetto allo scenario attuale.

4. Conclusioni

Lo studio modellistico di fluidodinamica computazionale condotto per porzioni di area di 1 km x 1 km ha permesso di valutare gli effetti sul microclima derivanti dalla realizzazione di un impianto fotovoltaico. Al fine di valutare gli impatti dell'opera sulle componenti microclimatiche e le potenzialità delle strategie di mitigazione e compensazione previste nelle azioni di ripristino, sono state quantificate le variazioni dei parametri di *albedo*, *Tair*, *RH*, *RH del suolo*, *MRT* e *PET* in due scenari di progetto e in uno scenario peggiorativo che è poi stato confrontato con lo scenario allo stato di fatto.

Le aree simulate possono essere replicate nello spazio e dunque i risultati ottenuti possono ritenersi validi per l'intera area di intervento.

I risultati sono in linea con quanto già osservato in letteratura scientifica e cioè che la **vegetazione** svolge **funzioni regolatrici** nel controllo delle condizioni **micrometeorologiche** e sulla percezione di comfort termico attraverso ombreggiamento ed evapotraspirazione²⁸.

Alla luce dei risultati ottenuti con il modello ENVI-met e analizzando nello specifico i dati della temperatura media radiante si ha evidenza che **il maggior ombreggiamento dovuto alla presenza di**

²⁷Mohammad, P. Aghlmand, S., Fadaei, A., Gachkar, S., Gachkar, D., Karimi, A., 2021. Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors. *Urban Climate*, 40, 100993

²⁸FAO., 2016. *Guidelines on urban and peri-urban forestry*, by F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro and Y. Chen. *FAO Forestry Paper No. 178*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perronace, L., Santiago, J., 2021a. *The Challenge in the Management of Historic Trees in Urban Environments during Climate Change: The Case of Corso Trieste (Rome, Italy)*. *Atmosphere*, 12, 500.

Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O. S., Santiago, J.L., Aarrevaara, E., Emmanuel, R., Buccolieri, R., 2021b. *Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy)*. *Climate*, 9, 116.

pannelli solari aumenta la concentrazione di acqua nel suolo e in tal modo può ridurre i rischi legati agli eventi siccitosi. In un contesto climatico europeo, quanto osservato è in linea con quanto riscontrato in letteratura e cioè che l'ombreggiamento comporta un **risparmio idrico** compreso fra il 14 ed il 29% a seconda del livello di ombreggiamento realizzato²⁹. Inoltre, l'aumento dell'umidità relativa dell'aria nelle zone sottostanti i moduli riduce la temperatura media dei moduli con evidenti **vantaggi nella conversione in energia elettrica.**

Considerato l'ulteriore miglioramento microclimatico con la presenza di bosco e macchia (azioni di ripristino) si rende necessario **dotare l'impianto di aree imboscite e fasce di mitigazione che limitino le alte temperature nei mesi più caldi e garantiscano un'alta efficienza energetica.** Inoltre, tale azione di mitigazione microclimatica e di miglioramento del comfort termico della vegetazione è di strategica importanza considerata la presenza, nel progetto, di aree destinate al pascolo al fine di evitare lo stress termico e garantire il benessere animale.

Non vi sono prove di effetti negativi significativi connessi agli effetti diretti e indiretti primari della misura nel corso del suo ciclo di vita in relazione all'obiettivo ambientale dell'adattamento ai cambiamenti climatici.

Per aumentare la resilienza dell'opera e per registrare gli effetti della stessa sul microclima si rende necessario dotare l'area di una **stazione meteorologica che consenta il monitoraggio costante** dei valori microclimatici. Gli stessi dati messi in relazione con i dati di efficienza energetica dei pannelli possono supportare lo sviluppo di ulteriori strategie di mitigazione.

²⁹ Marrou, H., Dufour, L., Wery, J. 2013. *How Does a Shelter of Solar Panels Influence Water Flows in a Soil-Crop System?* In: *European Journal of Agronomy* 50, 38-51.